

Antti Saikko

TARKKA 5G-LAITEPAIKANNUS

Vaatimukset ja potentiaalinen suorituskyky

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Antti Saikko: Tarkka 5G-laitepaikannus – Vaatimukset ja potentiaalinen suorituskyky
Kandidaatintyö, 30 sivua
Tampereen yliopisto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka
Pääaine: Tietoliikennetekniikka
Maaliskuu 2020

Uuden sukupolven 5G-mobiiliverkko tulee käyttöön vähitellen vuodesta 2020 eteenpäin. 5G on edeltäjiään entistä suorituskykyisempi mobiiliverkko, joka mahdollistaa monia uusia ja jatko-kehitettyjä käyttökohteita. Yksi 5G:n mahdollistamista käyttökohteista on tarkka 5G-laitepaikannus, jolla on potentiaalia parantaa paikannustarkkuutta esimerkiksi tiheästi rakennetuissa ympäristöissä tai sisätiloissa. Vaikka aihe on hyvin tuore ja käytännössä tulevaisuuden tekniikkaa, 5G-laitepaikannuksen vaatimuksista ja potentiaalisesta suorituskyvystä on olemassa runsaasti vaatimusmäärittelyjä ja simulointituloksia sisältäviä erillisiä dokumentteja. Tämän työn tavoitteena oli yhdistää keskeisimmät 5G-laitepaikannuksen vaatimukset ja potentiaalisen suorituskyvyn tiedot samaan dokumenttiin. Tavoitteena työssä oli myös käsitellä peruseriaatteet 5G-laitepaikannuksen toiminnasta ja taustasta.

Työ toteutettiin kirjallisuusselvityksenä ja lähdemateriaali koostui pääasiassa aiheeseen liittyvistä teknisistä raporteista, määrittelydokumenteista, alan keskeisten yritysten ja tutkimuslaitosten materiaaleista sekä langattomien paikannustekniikoiden perusteoksista. Aiheen vuoksi oli keskeistä, että lähdemateriaali oli tuoretta ja ajantasaista. Lähes kaikki lähdemateriaali olikin sähköistä aineistoa.

Työn avulla on mahdollista muodostaa kuva 5G-laitepaikannuksen toimintaperiaatteista ja taustasta. Työstä selviää 5G-paikannuksen perusvaatimukset sekä eri käyttökohteiden vaikutus paikannusvaatimukseen. 5G-laitepaikannuksella on työn perusteella runsaasti potentiaalia ratkaista nykyisten paikannusmenetelmien ongelmia, joita ovat esimerkiksi satelliittipaikannuksen epätarkkuus tiheästi rakennetuissa ympäristöissä, toimimattomuus sisätiloissa sekä erittäin tarkan paikannuksen korkeat kustannukset. Simuloidut paikannustulokset kertovat kuitenkin, että ne eivät vielä vastaa potentiaalisen suorituskyvyn odotuksia. Vaikka lupaaviakin tuloksia paikannustarkkuuden suhteen on olemassa, niiden luotettavuus on vielä vaihtelevaa ja virhelähteet, kuten synkronointivirhe, heikentävät paikannustuloksia vielä merkittävästi.

Avainsanat: paikannus, 5G, mobiiliverkko

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on kirjoitettu lukuvuoden 2019-2020 aikana. Työssä käsitellään tarkkaa laitepaikannusta 5G-mobiiliverkossa. Keskeisenä näkökulmana työssä on 5G-laitepaikannuksen vaatimukset ja potentiaalinen suorituskyky. Haluan kiittää ohjaajaani Jukka Talvitietä hyvästä ja innostavasta ohjauksesta sekä kehittävästä kommentoinnista työn eri vaiheissa.

Tampereella, 10.3.2020

Antti Saikko

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. 5G JA 5G-PAIKANNUS YLEISESTI.....	2
2.1 5G yleisesti	2
2.2 Motivaatio 5G-paikannuksen taustalla	3
2.3 5G:n käyttökohteet.....	4
2.4 Paikannuksen suorituskykyparametrit	6
2.5 Paikannusvaatimuksia eri käyttökohteille	7
3. POTENTIAALISIA 5G-PAIKANNUSMENETELMIÄ.....	10
3.1 Time of Arrival (TOA)	10
3.2 Time Difference of Arrival (TDOA).....	13
3.3 Angle of Arrival (AOA).....	14
3.4 Muita menetelmiä.....	16
4. TEOREETTISIA PAIKANNUSTARKKUUKSIA 5G-PARAMETREILLA.....	17
5. SIMULOITUJA 5G-PAIKANNUSTULOKSIA	21
5.1 Käytettyjä paikannusmenetelmiä.....	21
5.2 Tuloksiin vaikuttavia järjestelmän ominaisuuksia.....	21
5.3 Saavutettuja paikannustarkkuuksia	22
5.3.1 TDOA – Avotoimisto	22
5.3.2 TDOA – Mikrokaupunki	23
5.3.3 TDOA – Makrokaupunki.....	24
5.3.4 Kulmaperusteinen paikannus	25
5.4 Yhteenveto simuloiduista paikannustuloksista.....	26
6. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3rd Generation Partnership Project,
5G	Mobiiliverkkojen standardointijärjestöjen yhteistyöorganisaatio The Fifth Generation Wireless Technology for Digital Cellular Networks, Viidennen sukupolven mobiiliverkkotekniikka
AOA	Angle of Arrival, Tulokulma
AOD	Angle of Departure, Lähtökulma
AR	Augmented Reality, Lisätty todellisuus
CRLB	Cramér-Rao Lower Bound, Cramér-Raon alaraja
DL	Downlink, Alalinkki
FR1	5G Frequency Range 1, 5G-verkon taajuusalue 1
FR2	5G Frequency Range 2, 5G-verkon taajuusalue 2
GNSS	Global Navigation Satellite System, Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
IoT	Internet of Things, Esineiden internet
LOS	Line-of-Sight, Suora näköyhteys
NGMN	Next Generation Mobile Networks (Alliance), Matkapuhelinverkkojen parissa toimivia toimijoita yhdistävä liitto
NLOS	Non-Line-of-Sight, Ei näköyhteyttä
PDP	Power Delay Profile, Tehoviiveprofiili
QoS	Quality of Service, Palvelutaso / Palvelun laatu
RSS	Received Signal Strength, Vastaanotetun signaalin voimakkuus
RTK	Real Time Kinematic, Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus
SNR	Signal-to-noise ratio, Signaali-kohinasuhde
TOA	Time of Arrival, Saapumisaika
TDOA	Time Difference of Arrival, Saapumisaikojen erotus
UL	Uplink, Ylälinkki
ULA	Uniform Linear Array, Tasalineaarinen antenniryhmä
UMa	Urban Macro, Makrokaupunkiympäristö
UMi	Urban Micro, Mikrokaupunkiympäristö
VR	Virtual Reality, Virtuaalitodellisuus

1. JOHDANTO

Mobiiliverkkojen kehitys on mahdollistanut sujuvan internetin käytön ajasta tai paikasta riippumatta ja tehnyt internetistä merkittävän osan ihmisten jokapäiväistä elämää. Uuden sukupolven 5G-mobiiliverkon käyttö laajentuu vuodesta 2020 eteenpäin ja se tarjoaa korkeampaa suorituskyyä muun muassa luotettavuuden, paremman tiedonsiirtonopeuden, pienemmän viiveen ja pienemmän energiankulutuksen osalta. 5G mahdollistaa rakenteensa ja ominaisuuksiensa ansiosta myös paremmat paikannustarkkuudet verkko-pohjaisilla paikannusmenetelmillä. 5G-laitepaikannus tarjoaa ratkaisuja esimerkiksi satelliittipaikannuksen heikkoihin kohtiin, kuten tiheästi rakennettuihin ympäristöihin tai sisätiloihin. 5G-mobiiliverkossa paikannus on suunniteltu keskeiseen rooliin jo verkon vaatimuksia määriteltäessä, kun aiemmin paikannus on ollut mobiiliverkoissa lähinnä lisäominaisuus. Suuri osa 5G:n käyttökohteista pohjautuu siihen, että laitteen tai sensorin tarkka sijainti voidaan selvittää tai niiden sijaintia voidaan seurata. Siihen tarvitaan tehokkaita paikannusmenetelmiä, johon 5G tarjoaa monipuolisia mahdollisuuksia.

5G-laitepaikannuksen suorituskyyvylle on määritelty erilaisia vaatimuksia käyttökohteit-tain. Esimerkiksi sijaintitarkkuus halutaan tietää tietyllä tarkkuudella. 5G-laitepaikannuk-sen käytännön suoriutumista on myös simuloitu joidenkin käyttökohteiden osalta teoreet-tisten tapausten lisäksi. Tämän työn tarkoituksena on ollut selvittää ja yhdistää tieto 5G-laitepaikannuksen eri käyttökohteiden vaatimuksista sekä potentiaalisesta suorituskyyvystä samaan dokumenttiin. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä. Tässä työssä pai-kannusta on tarkasteltu pääosin alalinkin osalta, mutta samat periaatteet pätevät yleis-täen myös ylälinkin kohdalla. Keskeisimpien aiheiden lisäksi työssä selvitetään tuoreen 5G-mobiiliverkon ominaisuuksia ja potentiaalisia käyttökohteita sekä 5G-verkossa hyö-dynnettäviä paikannusmenetelmiä ja niiden toimintaperiaatteita. 5G on vasta alkuvai-heessa, joten työ avaa ennen kaikkea tulevaisuudennäkymiä 5G-laitepaikannuksen omi-naisuuksista ja mahdollisuuksista.

Työn luvussa 2 käsitellään 5G-mobiiliverkkoa yleisesti, motivaatiota 5G-laitepaikannuk-selle, 5G:n käyttökohteita sekä paikannuksen suorituskyykyparametreja ja paikannusvaa-timuksia eri käyttökohteille. Luvussa 3 esitellään 5G-verkon potentiaalisia paikannusme-netelmiä. Luvussa 4 käsitellään teoreettisia paikannustarkkuuksia 5G-verkon paramet-reilla ja luvussa 5 olemassa olevia käytännön simulaatioiden paikannustuloksia 5G-ver-kossa. Luku 6 on työn yhteenveto.

2. 5G JA 5G-PAIKANNUS YLEISESTI

5G New Radio on uuden sukupolven mobiiliverkko, joka tuo huomattavia parannuksia nykyisten mobiiliverkkojen ominaisuuksiin. 5G:n ominaisuuksilla vastataan mobiiliverkkojen vaatimuksiin ja liiketoiminnan tarpeisiin vuodesta 2020 eteenpäin. [1, s. 9–10]

Aiempiin mobiiliverkkoteknologioihin verrattuna 5G:ssä paikannus tulee olemaan yksi keskeisimmistä ominaisuuksista, joka huomioidaan 5G-verkon suunnittelussa ja toteutuksessa. Nykyisissä verkoissa paikannus on ollut enemmänkin lisäominaisuus. Paikannuksen kehittäminen 5G-verkossa vaatii kuitenkin uusien teknologioiden ja tekniikoiden kehittämistä, jotta erittäin tarkka ja energiatehokas laitepaikannus on hyödynnettävissä myös jo olemassa olevien sovellusten ja käyttökohteiden kanssa. [2]

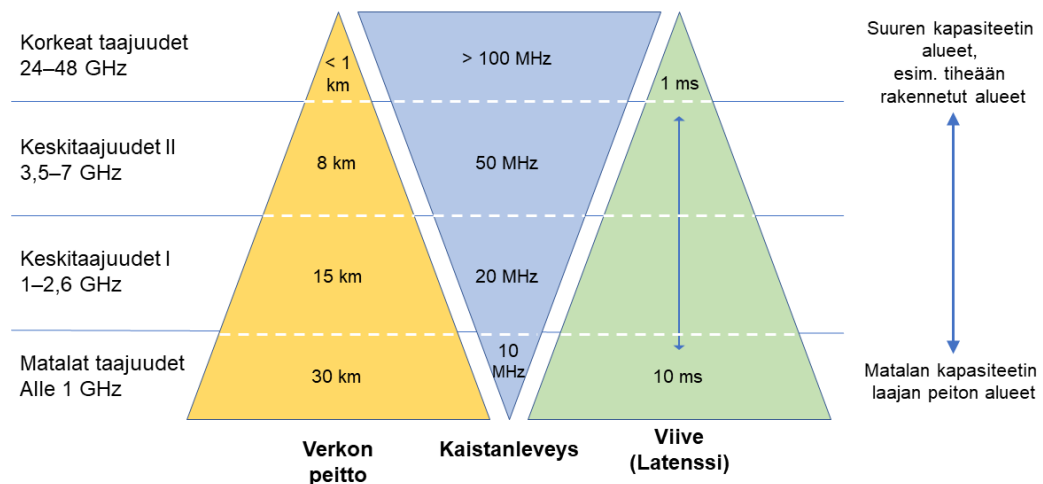
2.1 5G yleisesti

Mobiiliverkot ovat nykyään keskeisessä osassa ihmisen päivittäisessä elämässä. Perusasioihin nykyiset mobiiliverkot ovat riittäviä, mutta kasvaviin tarpeisiin vaaditaan entistä tehokkaampia ja monipuolisempia verkkoja. Paremmat verkot mahdollistavat myös uusien sovellusten ja käyttökohteiden kehittämisen. Esineiden internet (Internet of Things, IoT) on yksi esimerkki uusista käyttökohteista. 5G-verkko mahdollistaa paremman suorituskyvyn, kuten nopeammat yhteydet, pienemmän latenssin eli viiveen, erittäin korkean luotettavuuden, nopean verkon laajemman kattavuuden ja laajemman käyttöalueen. Myös turvallisuus ja luotettavuus sekä käyttäjän tunnistettavuus ja yksityisyys ovat 5G-verkossa huomioitavia asioita. [1, s. 9]

5G:hen kohdistuu vaihtelevia tarpeita, kuten erilaiset verkon käyttäjät, laitteet ja yhteydet. Tästä huolimatta 5G:ltä odotetaan saumatonta ja yhtenäistä käyttäjäkokemusten tarjoamista tilanteesta riippumatta. [1, s. 9] On kuitenkin muistettava, että 5G:n täyden potentiaalin hyödyntäminen asettaa myös käyttäjalaitteille uusia vaatimuksia [1, s. 30].

5G:n vaatimusten perusteella verkkoa kehitetään laajoille taajuuskaistoille. Vapaana olevaa laajaa taajuuspektriä on paremmin tarjolla korkeilla taajuuksilla [2]. Lisäksi korkeat kuljetustaajuuudet tarjoavat suuren kapasiteetin ansiosta 5G-verkon parhaimpia tiedonsiirtonopeuksia ja pienintä viivettä [3]. Kuvassa 1 on esitetty kaistanleveyden, verkon peiton ja viiveen väliset suhteet, jotka riippuvat taajuusalueista. Laajemmalla kaistanleveydellä voidaan päästä pienempiin viiveisiin, mutta kääntöpuolena on verkon peittoalueen pieneneminen. Korkeiden taajuuksien signaaleilla on lyhyempi kantama ja ne läpäisevät rakenteita heikommin, minkä vuoksi verkon tukiasemia on sijoitettava tiheästi

[2]. Etenkin tiiviisti rakennettujen kaupunkien keskusta-alueilla tukiasemaverkosto tulee olemaan tiheä, jotta voidaan vastata 5G:n vaatimuksiin. Verkon tiheys kuitenkin parantaa todennäköisyyttä näkyvän signaalin suoraan etenemiseen käyttäjälaitteen ja tukiaseman välillä. Verkkooperusteisten paikannusmenetelmien kannalta näkyvä signaali taas parantaa paikannusarvioiden tarkkuutta. [2]



Kuva 1. Verkon peiton, kaistanleveyden ja viiveen riippuvuus taajuusalueista. Muokattu lähteestä [3].

Korkeilla taajuuksilla aallot ovat millimetriaaltoja, minkä vuoksi antennit ovat pieniä kooltaan. Antenneja mahtuu pieniinkin tukiasemiin ja muihin laitteisiin suuri määrä. Se mahdollistaa laadukasta ja asettelultaan tiheät moniantenniryhmät. [3] 5G-verkot toteutetaan todennäköisimmin tukiasemilla, jotka hyödyntävät älykkäitä moniantenniratkaisuja. Moniantenneilla varustetut tukiasemat parantavat signaalin kulmaan perustuvan paikannuksen tarkkuutta. [2]

2.2 Motivaatio 5G-paikannuksen taustalla

Nykyiset paikannusmenetelmät tarjoavat useimpiin käyttötarpeisiin hyvää ja luotettavaa tarkkuutta. Satelliittiperusteisiin paikannusmenetelmiin (Global Navigation Satellite System, GNSS) haasteita luovat kuitenkin esimerkiksi suurkaupungit ja sisätilat, joissa satelliittien signaalit eivät pääse etenemään vastaanottoon ongelmitta. Tällaisiin tilanteisiin 5G-paikannus voisi olla merkittävää hyötyä tarjoava ratkaisu, sillä 5G:n on määritelty kattavan käyttökohteet niin sisä- kuin ulkotiloissa [4, s. 10].

Nykyisten paikannusmenetelmien ongelmiin vastaamisen lisäksi 5G:llä on potentiaalia tarjota parempaa paikannustarkkuutta matalammilla kustannuksilla verrattuna muihin menetelmiin [4, s. 10–11]. 5G-verkkoon perustuvalla paikannusmenetelmällä voidaan saavuttaa tarkkuus alle metristä jopa senttimetrin tarkkuuteen saakka [5]. Reaaliaikaisen

kinemaattisen mittauksen (Real Time Kinematic, RTK) ja GNSS-signaalit yhdistävä menetelmä voi saavuttaa jo nykyään senttimetritarkkuuksia paikannuksessa. RTK-menetelmä vaatii kuitenkin huomattavan arvokkaat laitteet ja yhteyden tarkasti tunnettuun maa-asemaan. [6] 5G-verkko voisi tarjota vastaavia paikannustarkkuuksia hyödyntämällä vain käyttäjälaitteiden ja tukiasemien välisiä signaaleita ja paikannuksen mahdollistavia laskentamenetelmiä.

Tarkkuus ei ole kuitenkaan ainoa asia, jota voidaan parantaa 5G:n avulla. Paikannusnäkökulmasta 5G:lle on asetettu erilaisia vaatimuksia, joihin pyritään vastaamaan. Esimerkiksi tiedonsiirron latenssi eli viive voidaan saada pienemmäksi kuin nykyisillä menetelmillä. Verkon monimutkaisuutta vähennetään, mikä helpottaa käyttäjälaitteiden vaatimuksia. Myös laitteiden energiankulutusta pienennetään, mikä tehostaa käyttöä ja säästää sähköä. Lisäksi tuki usean paikannusmenetelmän yhdistäville ratkaisuille mahdollistaa entistä paremman paikannustuloksen, kun tietoja saadaan eri lähteistä. [4, s. 10–11]

5G pyrkii myös mukautumaan käyttäjälaitteiden määrän mukaan. Tulevaisuuden esineiden internetin ja siitä seuraavien älykotien ja -kaupunkien yleistyminen moninkertaistaa verkoissa olevien laitteiden määrän, mikä vaatii asian huomioimista myös verkon kannalta. Korkea saatavuus on niin ikään keskeinen asia, jotta 5G-paikannuksen mahdollistamat ominaisuudet olisivat saavutettavissa mahdollisimman laajalla käyttöalueella. 5G:n odotetaan myös huomioivan turvallisuuden merkittävällä tavalla, koska käyttäjien on voitava luottaa siihen, ettei heidän sijaintitietojaan käytetä väärin. Paikannusinformaation väärinkäyttö on mahdollista, ja se voi vaarantaa ihmisten yksityisyyttä sekä turvallisuutta niin yksilön kuin yhteiskunnan tasolla. [4, s. 10–11]

2.3 5G:n käyttökohteet

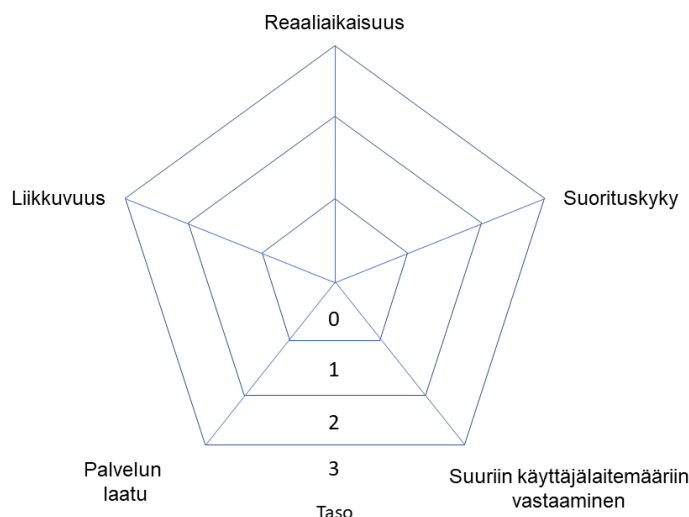
5G:n ansiosta useita nykyisiä tietoliikenneverkkoja hyödyntäviä sovelluksia on mahdollista parantaa ja voidaan kehittää uusia käyttökohteita. Teknologia-alan järjestöt ja yritykset ovat luoneet omia dokumenttejaan, joissa on käsitelty merkittävämpiä 5G:n käyttökohteita yleisen kehityksen ja liiketalouden näkökulmasta. Merkittävimmät suoranaiset 5G-käyttökohteet löytyvät muilta kuin paikannuksen alueilta, mutta 5G-paikannus on monien sovellusten ja käyttökohteiden pohjana ja perusteena.

Matkapuhelinverkkojen parissa toimivia operaattoreita, myyjiä, laitevalmistajia ja tutkimuslaitoksia yhdistävä liitto Next Generation Mobile Networks Alliance (NGMN) on määritellyt dokumentissaan *5G White Paper* erilaisia käyttökohteita 5G:lle. NGMN:n käsittelemiä käyttökohteita 5G:lle on 25 kappaletta, jotka on jaoteltu 8 ryhmään: nopean laajakaistan saavutettavuus, suuret laitemäärät, käyttäjän liikkuvuus, yhteyden erittäin pieni

viive, yhteyden äärimmäinen luotettavuus, suoratoistopalvelut, massiivinen esineiden internet sekä pelastusyhteydet esimerkiksi luonnonkatastrofin yhteydessä [1, s. 13]. Eri ryhmien kohdalla vaatimukset 5G-verkon suorituskykyparametreista vaihtelevat. Joissain käyttökohteissa odotetaan esimerkiksi erittäin korkeaa tiedonsiirtonopeutta, toisessa äärimmäisen pientä viivettä ja kolmannessa liikkuvuutta eli vaadittuihin tarpeisiin vastaamista laitteen ollessa hyvin nopeassa liikkeessä [1, s. 26–27].

Televiestintäjärjestelmien valmistaja Ericsson esittelee dokumentissaan *5G Use Cases* omia näkökulmiaan 5G:n käyttökohteiksi. Ericssonin esittelemiä käyttökohderyhmiä on 6 kappaletta: laajakaistan ja median saavutettavuus kaikkialla, älykkäät ajoneuvot ja rahoitusliikenne, kriittiset palvelut ja infrastruktuuri, etälaitteiden kriittinen kontrollointi, ihmisen ja koneen vuorovaikutus sekä sensoriverkot. [7, s. 2] Ericssonin dokumentissa tarkastellaan eri käyttötapausten kohdalla 5G:n luomia mahdollisuuksia, hyötyjä, käyttäjäryhmiä sekä käytännön esimerkkejä 5G:n radiosignaalin, runkoverkon ja hallinnan mahdollistamista näkökulmista. [7]

Telekommunikaatiolaitteiden valmistaja Huawei on julkaissut dokumentin *5G Unlocks A World of Opportunities – Top Ten 5G Use Cases*. Dokumentissa käsitellään Huaweiin näkökulmasta 10 parasta sovellusta, jotka hyödyntävät 5G:n monipuolisen potentiaalin [8]. Huawei on määritellyt markkinapotentiaalin eri käyttökohteiden osalta ja 5G-tekniikan merkittävyyden käyttökohteen näkökulmasta. Sen pohjalta Huawei on listannut käyttötapaukset yhdistetyn liiketaloudellisen ja teknologisen potentiaalinsa mukaiseen järjestykseen. 10 parasta käyttötapausta ovat virtuaalitodellisuus (Virtual Reality, VR) ja lisätty todellisuus (Augmented Reality, AR), älykkäät ajoneuvot, älykkäät tehtaات, älykkäät energiajärjestelmät, älykäs terveydenhuolto, korkealuokkaiset kotiviihdepalvelut, dronet, kehittyneet sosiaaliset mediat, henkilökohtaiset keinoälyavustajat ja älykaupungit. [8, s. 5] Huawei tarkastelee olennaisimpia yksittäisiä käyttökohteita viisikulmaisesta diagrammin avulla, jonka eri nurkissa on 5G:n suorituskykyyn liittyviä parametreja. Käytetyt parametrit ovat reaaliaikaisuus, liikkuvuus, suorituskyky, palvelun laatu (QoS, Quality of Service) ja tarve vastata suuriin käyttäjälaitemääriin. [8] Kuvassa 2 on esitetty Huaweiin käyttämä viisikulmainen parametradiagrammi. Viisikulmion eri tasot kuvaavat parametrin merkittävyyttä tarkastellun käyttökohteen osalta. Ulompi taso tarkoittaa luokittelussa suurempaa vaatimustasoa kyseisen parametrin osalta. Viisikulmioon muodostuvan alueen pinta-alan koko kuvastaa käyttökohteen vaatimuksia 5G-verkolta.



Kuva 2. Huaweiin käyttämä viisikulmainen parametradiagrammi. Muokattu lähteestä [8].

Standardointijärjestöjen yhteistyöorganisaation 3rd Generation Partnership Projectin (3GPP) julkaisemassa teknisessä raportissa 22.872 esitellään 5G:n käyttökohteita paikannusnäkökulmasta. Käsiteltyjä käyttökohteita on kaikkiaan noin 20 kappaletta ja ne on jaoteltu 6 pääryhmään. Ryhmät ovat sijaintiin perustuvat palvelut, teollisuus ja älykäs terveydenhuolto, hätätilanteet, tieliikenne, rautatieliikenne ja merenkulku sekä ilmaitu. Näiden lisäksi spesifikaatiosta löytyy muutamia edellä mainittujen ryhmien ulkopuolelle rajautuvia käyttötapauksia. [5] 3GPP:n jaottelussa erilaiset liikenteeseen ja liikkumiseen liittyvät tapaukset ovat merkittävässä osassa, jonka voidaan olettaa johtuvan paikannuksen merkittävyydestä näissä käyttötapauksissa. Huomataan kuitenkin, että paikannusnäkökulma liittyy vahvasti moniin erilaisiin arkielämän palveluihin ja toimintoihinkin.

2.4 Paikannuksen suorituskykyparametrit

Paikannuksessa on toisinaan tarve verrata eri menetelmien suorituskykyä tai ominaisuuksia erilaisissa tilanteissa ja tapauksissa. Paikannuksen suorituskykyparametrit antavat paremmin kuvaa menetelmien vastaavuudesta tarpeisiin. Suorituskykyparametrien avulla voidaan myös analysoida paikannusmenetelmien kehittymistä ajan kuluessa.

3GPP:n teknisessä dokumentissa 22.872 on käsitelty keskeisimpiä mitattavia asioita ja ominaisuuksia paikannuksen käyttötapauksissa [5, s. 10–12]. Näitä voidaan kutsua paikannuksen suorituskykyparametreiksi. Keskeisimpien suorituskykyparametrien lisäksi dokumentissa on käsitelty muitakin parametreja, jotka voivat olla tarpeellisia tiettyjen tapauksen analysoinnissa. [5, s. 10–12]

Keskeisimmät suorituskykyparametrit ovat paikannustarkkuus, nopeustarkkuus, suuntatarkkuus, aikaleiman täsmällisyys, saatavuus, latenssi eli viive, alkusijainninmäärityksen

kesto, päivitystahti, tehonkulutus, sijainninmäärittelyn vaatima virta sekä systeemin skaalautuvuus. Lisäksi joillain sovelluksilla saattaa olla erityisiä tarpeita palvelun laadun varmistamiseksi. Tällaiset sovellukset ovat pääosin kriittisiä turvallisuuden tai vastuullisuuden kannalta. [5, s. 10–12]

Keskeisimpien suorituskykyparametrien lisäksi joissain tapauksissa myös seuraavat ominaisuudet ja mitattavat asiat ovat tarkastelun kohteena: jatkuvuus, luotettavuus, eheys, hälytysaika, todentaminen sekä turvallisuus ja yksityisyys. [5, s. 11]. Nämä parametrit koskevat erityisesti korkeaa tietoturvaa vaativia sovelluksia.

Paikannukseen vaikuttaa merkittävästi käyttötilanne ja käyttöympäristö. Paikannuksen suorituskykyyn ja paikannukseen liittyvien teknologioiden toimintatilaan vaikuttavia keskeisiä näkökulmia huomioidaan 3GPP:n dokumentissa joidenkin paikannuksen käyttökohteiden osalta. Huomioituja parametreja ovat käyttöympäristö, 5G-paikannuksen palvelualue, rajattu tai kohdistettu palvelualue, paranneltu paikannusalue, käyttäjälaitteen dynaamisuus, käyttäjälaitteiden määrä tietyllä alueella sekä paikannuslähteiden tiheyden huomiointi ja sen vaikutukset paikannuksen suorituskykyparametreihin. [5, s. 11–12]

2.5 Paikannusvaatimuksia eri käyttökohteille

3GPP:n teknisen raportin 38.855 mukaan 5G-paikannuksen tutkimuksille on säädelty muutama minimivaatimus paikannuksen suorituskyvyn osalta. Lisäksi kaupallisia käyttötapauksia varten on määritelty astetta korkeammat suorituskykytavoitteet. Yksityiskohteisemmat paikannusvaatimukset kuitenkin vaihtelevat riippuen tarkemmasta käyttökohteesta. Osassa käyttökohteista vaaditaan parempaa suorituskykyä ja toisissa riittää perusehtoja heikompiakin suoritusten. [4, s. 11]

Minimisuorituskykyvaatimuksiksi 5G-paikannuksen tutkimusten pohjaksi on määritelty vaakasuuntaisen sijainnin virheeksi alle 50 metriä ja pystysuuntaisen sijainnin virheeksi alle 5 metriä 80 %:lle tapauksista. Sekä tiedonsiirron viive että alkusijainninmäärittelyn kesto täytyy olla alle 30 sekuntia. [4, s. 11]

Kaupallisten käyttötapauksien suorituskykyvaatimukset ovat hiukan korkeammat kuin minimivaatimukset. Sisätilapaikannuksessa sekä vaaka- että pystysuuntaisen sijainnin virhe tulisi olla alle 3 metriä 80 %:lle tapauksista. Ulkotiloissa vaakasuuntaisen sijainnin virhe täytyisi olla myös alle 3 metriä ja pystysuuntaisen sijainnin virhe alle 10 metriä 80 %:lle tapauksista. Viive tiedonsiirtoketjun päästä päähän tulisi olla alle 1 sekunti. [4, s. 11]

Paikannusvaatimusten osalta yhden ehdon täyttyminen on yleensä helposti toteutettavissa, mutta haaste syntyy eri vaatimusten täyttämisestä samaan aikaan. Esimerkiksi sijaintitarkkuus voidaan hyvin varmasti määrittää vaaditulla tarkkuudella, mutta saman toteuttaminen esimerkiksi tietyssä ajassa ja laitteen ollessa liikkeessä vaatii erilaista suunnittelua ja toteutusta. Sen vuoksi käyttökohteille on luotu tietyt paikannusvaatimukset, jotta tarpeisiin voidaan vastata.

3GPP:n teknisessä raportissa 22.872 on esitetty lukuisa määrä potentiaalisia paikannusvaatimuksia eri käyttökohteille [5]. Paikannusvaatimukset saattavat vaihdella jopa saman käyttökohteen kohdalla eri tilanteissa. Tämän vuoksi yleispäteviä vaatimuksia on haastavaa esittää, mutta taulukossa 1 on esitetty ryhmiteltyjä 5G:n käyttökohteita ja niiden potentiaalisia paikannusvaatimuksia.

Taulukossa 1 on ryhmitelty 5G:n eri käyttötapauksia paikannusnäkökulmasta kolmeen pääryhmään. Jokaisen ryhmän osalta on esitetty viiden suorituskykyparametrin arvoja neljässä erilaisessa paikannusympäristössä. Sisätilapaikannuksen parametreja on käsitelty vain relevanttien tapausten kohdalla. Taulukon perusteella voi huomioda, että yleisen 5G-verkon alueen lisäksi toisinaan tiettyjä alueita vahvistetaan paremman paikannustuloksen saavuttamiseksi esimerkiksi lisätukiasemien avulla. Osa taulukon arvoista on esitetty arvojen vaihteluvälillä, koska ryhmien sisällä olevien käyttötapauksien tarpeet vaihtelevat hiukan.

Taulukon tietojen perusteella huomataan, että paikannustarkkuuden vaatimus vaihtelee jonkin verran käyttökohteen tyyppin mukaan. Koneiden hallintaan ja liikenteeseen liittyvissä käyttötapauksissa vaaditaan hyvää paikannustarkkuutta ilman paranneltua paikannusympäristöä. Myös saatavuus tulee näissä käyttökohteissa olla korkealla tasolla ympäristöstä riippumatta. Erittäin matalan virrankulutuksen kohteiden paikannustarkkuudelle ei voida asettaa kovin suuria vaatimuksia, vaan niissä on pyritty maksimoimaan energiatehokkuus. Saatavuus näissäkin kohteissa on silti vaatimukseltaan erittäin korkea tasoa. Kädessä pidettävät laitteet ja puettavat laitteet ovat yleensä käytössä kaikkialla eli myös sisätiloissa, joten niille on määritelty vaatimukset 5G-paikannuksen yleiselle palvelualueelle myös sisätiloihin.

Taulukko 1. 5G:n käyttötapauksia paikannusnäkökulmasta.
Muokattu lähteestä [5, s.46–47].

Laitteen tyyppi	Käyttötapauksia	Suorituskykyparametri	Palvelualue – käyttöympäristö			
			Paranneltu paikannus-alue	5G-paikannuksen yleinen palvelualue		
			Ulkoympäristö / Sisätilat	Ulkoympäristö (harvaan rakennettu)	Ulkoympäristö (tiheään rakennettu)	Sisätila
Erittäin matala virrankulutus (jopa 15 vuoden käyttöikä)	Jätehuolto Rahdin seuranta ja hallinta	Vaakatason sijaintitarkkuus	1 m	3 m – 30 m	3 m – 30 m	
		Pystysuuntainen sijaintitarkkuus				
		Nopeustarkkuus (suuntatarkkuus)		5 m/s	5 m/s	
		Saatavuus	99 %	99 %	99 %	
		Alkusijainninmäärittäytksen kesto	10 s			
Kädessä pidettävät laitteet / puettavat laitteet	Kaupunkipyörät Lisätty todellisuus Puettavat laitteet Sijaintiin perustuva kohdennettu mainonta Toimintoja sujuvoittavat sovellukset Potilaiden paikannus Hätätilanteet	Vaakatason sijaintitarkkuus	0,2 m – 1 m	1 m – 3 m	1 m – 3 m	10 m – 50 m
		Pystysuuntainen sijaintitarkkuus	Ulkona: 1 m – 3 m Sisällä: 0,1 m – 1 m	3 m	3 m	0,1 m – 3 m
		Nopeustarkkuus (suuntatarkkuus)		2 m/s (10°)	2 m/s (10°)	
		Saatavuus	80 % – 99 %	80 % – 99 %	80 % – 99 %	95 %
		Alkusijainninmäärittäytksen kesto	10 s – 30 s	10 s – 30 s	10 s – 30 s	10 s – 30 s
Koneiden hallinta / liikenne	Kuljetuskärryjen sijaintitiedot Liikenteenvalvonta ja -hallinta Tienkäyttäjien laskutus Miehittämättömien ilma-alusten kauko-ohjaus ja data-analyysi Tuki eri paikannuspalveluiden yhdistämiselle	Vaakatason sijaintitarkkuus	0,1 m – 0,5 m	0,1 m – 3 m	1 m – 3 m	
		Pystysuuntainen sijaintitarkkuus	0,1 m	0,1 m – 0,3 m	2,5 m	
		Nopeustarkkuus (suuntatarkkuus)		0,5 m/s (2°) – 2 m/s	0,5 m/s (2°) – 2 m/s	
		Saatavuus	99 % – 99,9 %	95 % – 99,9 %	95 % – 99,9 %	
		Alkusijainninmäärittäytksen kesto	1 s – 10 s	1 s – 10 s	1 s – 10 s	
Värien selitteet:						
	Erittäin korkean tarkkuuden käyttökohteet, jotka toimivat paikannuksen kannalta suotuisissa ympäristöissä					
	Korkean tarkkuuden käyttökohteet, joilla pienemmät vaatimukset saatavuuden osalta					
	Maltillisten tavoitetarkkuuksien käyttökohteet					

3. POTENTIAALISIA 5G-PAIKANNUSMENETELMIÄ

Paikannus perustuu radioaalto-signaalien kulkemiseen väliaineessa. Sijainnin määrittämistä varten mitataan fysikaalisia suureita, kuten aikaa, jonka signaali käyttää lähettimen ja vastaanottimen välillä kulkemiseen. Useista eri lähettimistä saatujen mittaustulosten perusteella vastaanottimen sijainti voidaan määrittää laskennallisesti. [9, s. 21] Useimmissa paikannusmenetelmissä pohjana on siis mittaustulos, jonka perusteella sijainti voidaan selvittää erilaisten analyysi- ja laskentamenetelmien avulla [9, s. 35].

Seuraavissa alaluvuissa esiteltävät potentiaaliset 5G-paikannusmenetelmät Time of Arrival (TOA), Time Difference of Arrival (TDOA) ja Angle of Arrival (AOA) perustuvat tukiasemien ja päätelaitteiden välisien geometristen etäisyyksien mittaamiseen. TOA:ssa ja TDOA:ssa etäisyydet mitataan epäsuorasti vastaavien signaalien etenemisviiveisiin perustuen. Kyseisissä menetelmissä oletetaan, että signaali etenee valonnopeudella. [9, s. 21–22] AOA:ssa mitataan signaalin tulokulmaa päätelaitteeseen [9, s. 32–33]. Sekä TOA:ssa, TDOA:ssa että AOA:ssa oletetaan, että signaalit kulkevat lyhintä reittiä lähettimestä vastaanottimeen. Signaalin reittiä voi pidentää erilaiset fysikaaliset ilmiöt, kuten esimerkiksi heijastuminen, taittuminen ja taipuminen. Näissä tapauksissa laitteen sijainnin laskennallinen määrittäminen muuttuu huomattavasti haastavammaksi. [9, s. 21–22]

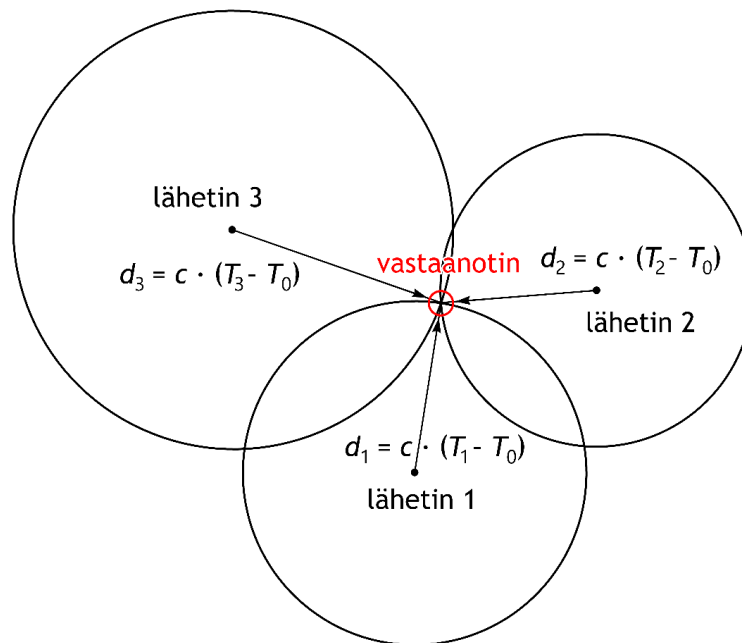
3.1 Time of Arrival (TOA)

Saapumisaikaan perustuva paikannusmenetelmä (Time of Arrival, TOA) pohjautuu signaalin etenemisviiveen mittaamiseen. TOA:n perusteena on siis signaalin lähetetty- ja vastaanotettu aika. Kun oletetaan, että signaali kulkee valonnopeutta, saadaan lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys laskettua kaavalla

$$d_i = c(T_i - T_0) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

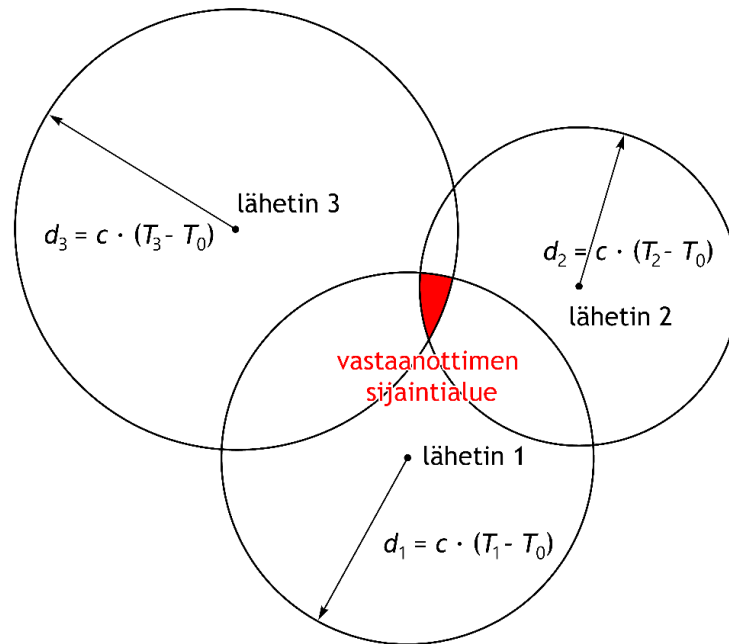
jossa c on valonnopeus, T_i on signaalin vastaanotettu aika ja T_0 on signaalin lähetysaika. x_i , y_i ja z_i ovat lähettimen sijaintikoordinaatit kolmannessa ulottuvuudessa. Kaksiulotteisessa tilanteessa sijainnilla on vain x - ja y -komponentit. TOA:ssa kaavaa 1 käytettäessä oletetaan, että lähettimen ja vastaanottimen välillä on näköyhteys ja signaali etenee suoraan lähettimestä vastaanottimeen (Line-of-Sight, LOS). [9, s. 23]

Yhden etäisyysmittauksen perusteella voidaan luoda toisessa ulottuvuudessa d_1 -säteen ympyrä ja kolmannessa ulottuvuudessa pallo, jonka keskipisteenä on signaalin lähettänyt tukiasema. Paikannettava laite voi siis sijaita missä vain kyseisellä ympyrällä tai pallolla. Jotta sijainnin mahdollinen paikka voidaan rajata yhteen, tarvitaan kaksiulotteisessa tilanteessa mittaustulokset vähintään 3 tukiaseman osalta. Kolmiulotteisessa tilanteessa mittaustuloksia tarvitaan vähintään 4 tukiasemasta. TOA-menetelmää voidaan kutsua myös nimellä trilateraatio ja se on esimerkiksi satelliittipaikannussysteemien käyttämä menetelmä. [9, s. 82–83] Kuvassa 3 on esitetty vastaanottimen sijainnin paikannus virheettömässä kaksiulotteisessa tilanteessa. Lähettimien ympärille on piirretty TOA:n perusteella määritetyt ympyrät, joiden leikkauspisteestä voidaan ratkaista vastaanottimen sijainti.



Kuva 3. TOA-menetelmän periaate virheettömässä kaksiulotteisessa tapauksessa. Muokattu lähteestä [9, s. 24].

Käytännön systeemeissä mittauksiin sisältyy aina virhelähteitä, kuten kellovirheitä ja kohinaa. Sen vuoksi ei yleensä ole yksikäsitteisiä ratkaisuja. Tällöin geometrisesti tilannetta hahmotellessa tukiasemien ympärille piirretyt ympyrät eivät leikkaa. Näin paikannettavalle laitteelle ei synny tiettyä pistemäistä sijaintia, vaan alue, jonka sisällä laite sijaitsee. [9, s. 23–24] Kuvassa 4 on esitetty edellä kuvattu tilanne, jossa virheen takia määritellyt etäisyydet vastaanottimesta lähettämiin ovat vääristyneet.



Kuva 4. TOA-menetelmän kaksiulotteinen tilanne, jossa lähettimien etäisyyksien perusteella määritellyt ympyrät eivät muodosta tiettyä leikkauspistettä vaan leikkausalueen.

Laitteen ja tukiasemien kellojen pienikin eriaikaisuus aiheuttaa myös virhettä paikannukseen. Signaalin tarkkojen etenemisviiveiden selvittäminen vaatisi sen, että tukiasemien ja päätelaitteen kellot olisivat täsmälleen samassa ajassa. Kyseinen vaatimus on haastavaa saavuttaa. Etenkin massamarkkinoille suunnatut mobiililaitteet hyödyntävät usein edullisia elektroniikkakomponentteja, joiden kellojen tarkkuus ei ole riittävä ja komponenttien ei voida luottaa toimivan pysyvästi varmalla tavalla. Ongelma voidaan ratkaista käsittelemällä tukiaseman kelloa tuntemattomana virhelähteenä. [9, s. 24–25]

Myös ilman näköyhteyttä tapahtuva eteneminen (Non-Line-of-Sight, NLOS) on merkittävä virhelähde. NLOS-eteneminen on maapallolla sijaitsevista langattomissa tietoliikennejärjestelmissä tyypillinen ilmenemismuoto. NLOS-etenemiseen liittyviä fysikaalisia ilmiöitä ovat heijastuminen, taipuminen ja taittuminen. NLOS-etenemisessä signaali ei kulje lähettimestä vastaanottimeen suorinta mahdollista reittiä. Täten etenemisviive on suurempi kuin esteittä kulkevalla signaalilla. Jos päätelaitetta ei ole määritetty huomioidaan signaalin reitin pitenemistä, se olettaa reitin suoraviivaiseksi ja virhe syntyy etäisyyden määrittämiseen. Jos kuitenkin signaalin reittiä muuttaneen kohteen sijainti tiedetään, voidaan etäisyys siihen määrittää ja huomioida tilanne sijainnin määrittämisessä parantaen sijainnin tarkkuutta. Jos kohteen sijaintia ei tiedetä, se aiheuttaa lisää tuntemattomia ratkaisuihin ja vaikeuttaa laskentaa. [9, s. 25–26]

3.2 Time Difference of Arrival (TDOA)

Saapumisaikojen erotukseen perustuva menetelmä (Time Difference of Arrival, TDOA) on TOA:n kaltaisesti etenemisviiveeseen pohjautuva paikannusmenetelmä. Perusole-
tuksat TDOA:ssa ovat vastaavat kuin TOA:ssa eli signaalin nopeus on tunnettava ja pe-
rustapauksessa oletetaan LOS-eteneminen. TDOA poikkeaa TOA:sta siten, että pelkän
etenemisviiveen sijaan määritetään etenemisviiveiden eroja. TDOA:n avulla vältetään
tukiasemien ja päätelaitteen kellojen eriaikaisuuden vaikutukset. [9, s. 26–28]

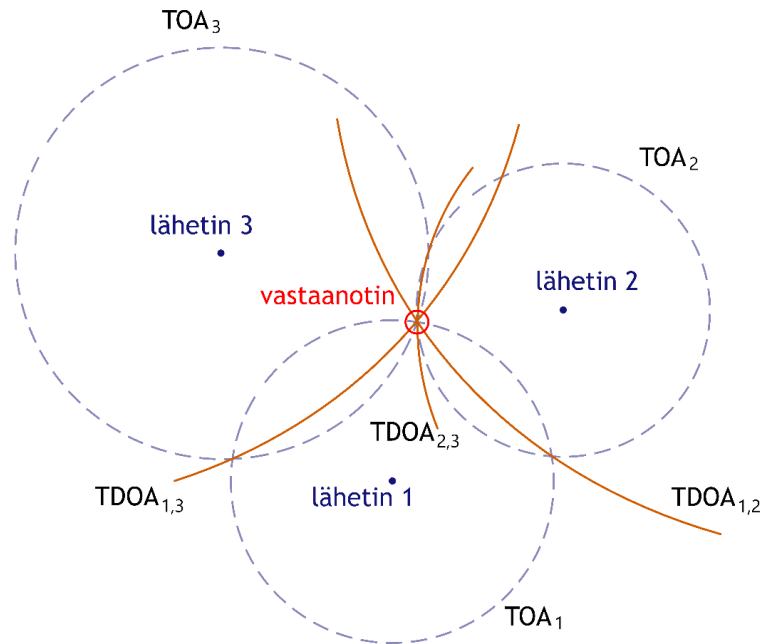
TDOA:ssa etenemisetäisyyksien ero kahteen lähettimeen saadaan laskettua etenemis-
viiveiden erotuksen perusteella kaavalla

$$\Delta d_{i,j} = d_i - d_j = c(T_i - T_0) - c(T_j - T_0) = c(T_i - T_j) = c \cdot \Delta T_{i,j} \quad (2)$$

jossa d_i on etäisyys lähettimeen i , d_j on etäisyys lähettimeen j , c on valonnopeus, T_0 on
signaalin lähetysaika, T_i on lähettimestä i saapuneen signaalin vastaanotettu aika, T_j on
lähettimestä j saapuneen signaalin vastaanotettu aika ja $\Delta T_{i,j}$ on etenemisviiveiden
ero. [9, s. 26]

Kaavan 2 perusteella huomataan, että TDOA-menetelmällä päästään eroon signaalin
lähetetystä ajasta. Koska sekä T_i että T_j ovat mittaustuloksia vastaanottimessa, vältetään
TDOA-menetelmällä lähettimien ja vastaanottimen mahdollisesti eroavien kellojen ai-
heuttamat ongelmat. [9, s. 26]

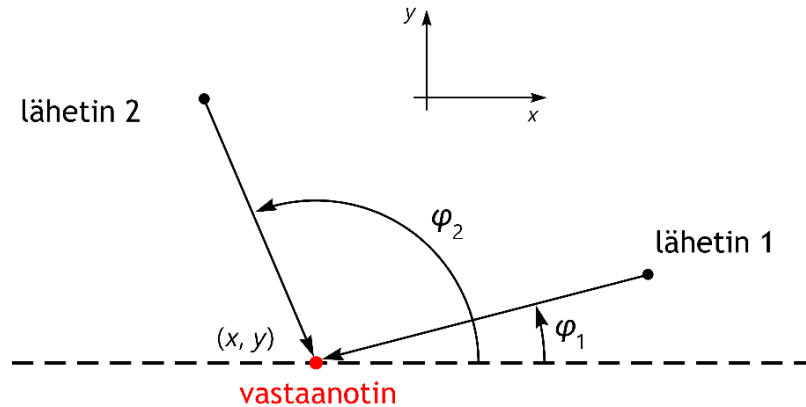
TDOA:ssa etenemisviiveiden erot voidaan esittää lähettimeen nähden muodostuvana
joukkona, joka muodostaa kaksiulotteisessa tapauksessa hyperbelin. Lähetin sijaitsee
hyperbelin polttopisteessä. Tämän vuoksi TDOA-menetelmää kutsutaan myös nimellä
hyperbolinen paikannus. Useamman lähettimen ympärille muodostuvat hyperbelit luovat
toisensa leikkaavan alueen, joka kuvastaa arviota sijainnista. Ideaalissa tilanteessa leik-
kauspisteet kertoisivat tarkan sijainnin, mutta signaaliin kohdistuu TOA:n kaltaisesti vir-
helähteitä. Virheiden suuruuden perusteella paikannustarkkuus heikkenee tai paranee.
Kolmiulotteisessa tilanteessa periaate on sama, mutta muodostuva joukko on hyperbo-
loidin muodossa. [9, s. 27–28] Kuvassa 5 on esitetty ideaalinen kaksiulotteinen tilanne
TDOA-menetelmästä. Lähettimien etenemisetäisyyksien erojen perusteella muodostuu
hyperbelit, joiden leikkauspisteessä vastaanotin sijaitsee. Kuvassa on esitetty vertailun
vuoksi myös TOA-menetelmällä määritetyt etäisyydet.



Kuva 5. TDOA- ja TOA-menetelmän vertailu virheettömässä kaksiulotteisessa tilanteessa. Oranssit viivat kuvastavat TDOA-menetelmällä määritettyjä hyperbelejä ja katkoviivaympyrät TOA-menetelmällä laskettuja etäisyyksiä. Muokattu lähteestä [10, s. 20].

3.3 Angle of Arrival (AOA)

Saapumiskulmaan perustuva paikannusmenetelmä (Angle of Arrival, AOA) on kolmas potentiaalinen 5G-paikannuksen menetelmä. Kaksiulotteisessa LOS-etenemisen tapauksessa saapuvan signaalin tulokulma φ_i ja tiedossa olevan lähettimen sijainti (x_i, y_i) määrittävät suoran linjan, jolla vastaanotin voi sijaita. Kun mittaustiedot saadaan vähintään kahdesta lähettimestä, linjojen leikkauspiste kertoo vastaanottimen sijainnin. [9, s. 32–33] Paikannusta voidaan toteuttaa myös signaalien lähtökulmaan perustuvalla menetelmällä (Angle of Departure, AOD). AOD-menetelmän periaate on samanlainen kuin AOA:ssa, mutta signaalin saapumiskulman sijaan käytetään lähtökulman tietoja. Kuvassa 6 on esitetty AOA:n kaksiulotteinen tapaus.



Kuva 6. AOA:n periaate kaksiulotteisessa tilanteessa.
Muokattu lähteestä [9, s. 33].

AOA-menetelmää käytettäessä vastaanottimen kaksiulotteinen sijainti (x, y) voidaan määrittää kahden lähettimen signaaleista lineaarisella yhtälöparilla

$$\begin{aligned} y - y_1 &= \tan(\varphi_1)(x - x_1) \\ y - y_2 &= \tan(\varphi_2)(x - x_2) \end{aligned} \quad (3)$$

jossa x_1 ja y_1 ovat lähettimen 1 sijaintikoordinaatteja, x_2 ja y_2 ovat lähettimen 2 sijaintikoordinaatteja, φ_1 on signaalin tulokulma lähetimestä 1 ja φ_2 on signaalin tulokulma lähetimestä 2. [9, s.32]

Kaavaa 3 käytettäessä vaatimuksena on, että vastaanottimen asento tiedetään. Jos asentoa ei tiedetä, se tekee paikannuksesta vaikeamman. Eri pisteissä sijaitsevilla vastaanottimilla voi olla samat suuntakulmat, jos ne ovat eri asennoissa. Ei siis voida tietää oikeaa sijaintia kahden lähettimen perusteella. Tässä tapauksessa tarvitaan vähintään yksi mittaustulos lisää eri lähetimestä. Tällöin saadaan yhtälöryhmät muodossa

$$y - y_i = \tan(\varphi_i + \varphi)(x - x_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

jossa φ on tuntematon vastaanottimen asento. [9, s. 33]

Kolmiulotteisessa tilanteessa periaate on sama, mutta toisesta lähetimestä tarvitaan tietoon signaalin suuntakulman (azimuth) lisäksi korkeuskulma (elevation). Yhden lähettimen perusteella saadaan selville taso, jolla vastaanotin voi sijaita. Toisesta lähetimestä saadun suuntakulman ja korkeuskulman perusteella määritetty suora leikkaa tason tietyssä pisteessä. Tämä leikkauspiste on laitteen paikannettu sijainti. [9, s. 33–35]

Kolmiulotteisessa tapauksessa vastaanottimen sijaintia (x, y, z) määrittäessä lisätään z -komponentit tarkasteluun. Yhtälöryhmien kaava muuttuu muotoon

$$\begin{aligned} (y - y_i) &= \tan(\varphi_i + \varphi)(x - x_i) \\ \cos(\varphi_i + \varphi)(z - z_i) &= \tan(\vartheta_i + \vartheta)(x - x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

jossa ϑ on vastaanottimen korkeuskulma ja ϑ_i on lähettimen korkeuskulma. [9, s. 34]

Yhtälössä 5 on viisi tuntematonta: vastaanottimen sijainti (x, y, z) ja vastaanottimen asento (suuntakulma φ ja korkeuskulma ϑ). Niiden ratkaisemiseksi tarvitaan vähintään 5 yhtälöä, jotka voidaan muodostaa suunta- ja korkeuskulmamittauksilla vähintään 3 lähettimeen. [9, s. 34–35]

3.4 Muita menetelmiä

Edellisissä alaluvuissa esiteltyjen paikannusmenetelmien lisäksi yksi potentiaalinen paikannusmenetelmä on fingerprinting. Fingerprinting perustuu signaalien ominaisuuksien mittaamiseen eri puolilla kartoitettavaa ympäristöä. Useimmissa tapauksissa saatujen mittaustulosten perusteella luodaan tietokanta signaalien ominaisuuksista ja ilmenemisestä ympäristössä. Paikannettavalla laitteella mitataan ympäristön signaaleita ja verrataan saatuja mittaustuloksia tietokantaan. Vertailun perusteella lähimmät vastaavat tulokset paljastavat laitteen todennäköisimmän sijainnin. [9, s. 35–36]

Fingerprinting-menetelmän pohjalla oleva tietokanta voidaan tuottaa esimerkiksi suorittamalla mittauksia eri pisteissä tai hyödyntämällä erilaisia simulaatiomenetelmiä, kuten säteenseurantaa. Fingerprinting voi perustua esimerkiksi vastaanotettuun signaalin voimakkuuteen (RSS-menetelmä) tai tehoviiveprofiiliin (PDP-menetelmä). [9, s. 36] Periaatteessa paikannukseen soveltuu mikä tahansa sellainen mittaus, joka on riippuvainen laitteen sijainnista.

4. TEOREETTISIA PAIKANNUSTARKKUUKSIA 5G-PARAMETREILLA

Cramér-Raon alaraja (Cramér-Rao Lower Bound, CRLB) on varianssin teoreettinen arvio, joka kuvaa laskenta-algoritmin pienintä mahdollista virhettä biasoitumattomassa tapauksessa [9, s.41]. Yksinkertaisimmillaan Cramér-Raon alarajan määritelmän mukaan minkä tahansa biasoitumattoman arvion varianssi on vähintään yhtä suuri kuin Fisher-informaation käänteisluku [11]. Fisher-informaatiolla $I(\theta)$ mitataan sitä, kuinka paljon tietoa tuntemattomasta parametrasta θ voidaan yksittäisellä näytteellä saada [12]. Yksinkertainen muoto Cramér-Raon alarajasta voidaan siis esittää yleisesti muodossa

$$\sigma^2_{\text{CRLB}} \geq \frac{1}{I(\theta)} \quad (6)$$

jossa $I(\theta)$ on Fisher-informaatio [11].

Paikannustarkkuuksien kohdalla Cramér-Raon alarajan avulla voidaan arvioida pienintä potentiaalista virhettä, joka järjestelmän parametreilla voidaan saavuttaa. Kulma- ja etäisyysestimointitarkkuus perustuvat CRLB:n periaatteeseen. 5G-mobiiliverkoissa toimivan tarkan laitepaikannuksen kannalta teoreettiset rajat paikannustarkkuuksille ovat kiinnostava tieto, sillä 5G-verkot ovat vasta kehityksessä ja etenkin normaalissa käyttäjäympäristössä olevia 5G-verkkoja on vuoden 2020 alussa vasta hyvin vähän käytössä.

Kulmaestimointitarkkuus eli AOA-estimointivirheen varianssi voidaan esittää kaavalla

$$\sigma^2_{\text{AOA}} \geq \frac{6}{L(L^2 - 1) \text{SNR} \pi^2 \cos^2(\alpha)} \quad (7)$$

jossa L on tasalineaarisen antenniryhmän (Uniform Linear Array, ULA) antennielementtien lukumäärä, SNR on signaalikohinasuhde lineaariasteikolla ja α on estimoitava kulma radiaaneissa suhteessa oletettuun antenniryhmään. [9, s. 65-66]

Aikaestimointitarkkuus eli TOA-estimointivirheen varianssi OFDM-aaltomuodolle voidaan esittää kaavalla

$$\sigma^2_{\text{TOA}} \geq \frac{1}{8\pi^2 f_{\text{SC}}^2 \text{SNR} \frac{M(M+1)(2M+1)}{3}} \quad (8)$$

jossa f_{SC} on alikantaaaltojen taajuusväli, SNR on signaalikohinasuhde lineaariasteikolla ja M on alikantaaaltojen kokonaislukumäärän määräävä termi. Termillä M määrätään

alikantaaaltojen kokonaislukumäärä N ja näin ollen myös kaistanleveys, siten että $N = 2 \cdot M + 1$, jolloin kokonaiskaistanleveys on $B = Nf_{SC} = (2M + 1)f_{SC}$. [9, s. 49-51]

Aikaestimaatin virheen varianssi saadaan muutettua etäisyysmuotoon kertomalla aika-estimointitarkkuus signaalin etenemisnopeudella. Etäisyysestimaatin virheen varianssi voidaan esittää kaavalla

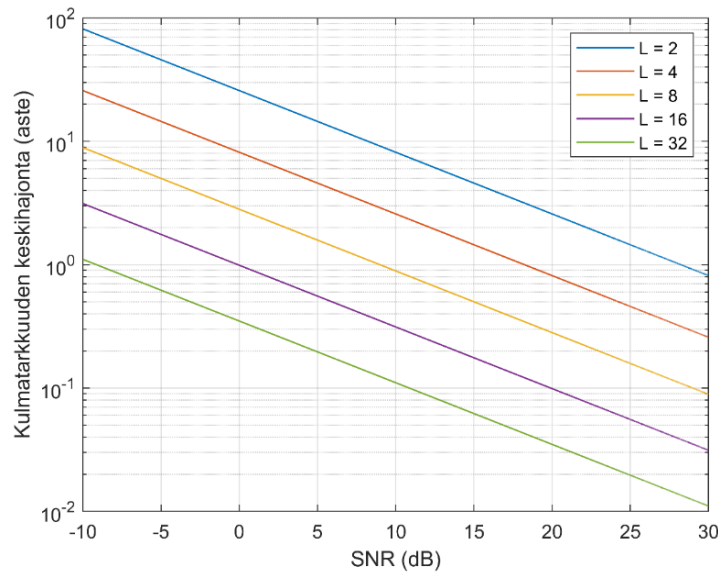
$$\sigma_{\text{TOA_etäisyys}}^2 = c^2 \sigma_{\text{TOA}}^2 \quad (9)$$

jossa c on valonnopeus ja $\sigma_{\text{TOA_aika}}^2$ on aikaestimointitarkkuus eli TOA-estimointivirheen varianssi [9].

Kuvissa 7, 8 ja 9 on esitetty kulma- ja etäisyysestimaattitarkkuuksia eri järjestelmäparametreilla signaali-kohinasuhteen (Signal-to-noise ratio, SNR) funktiona. Kuvaajat on tehty Matlab-ohjelmistolla hyödyntäen edellä esitettyjä kaavoja 7, 8 ja 9. Kaavojen 7 ja 9 varianssin sijaan kuvaajissa on kuitenkin esitetty keskihajonta, joka on saatu ottamalla varianssista neliöjuuri. Keskihajonnasta nähdään paremmin keskimääräisen virheen suuruus.

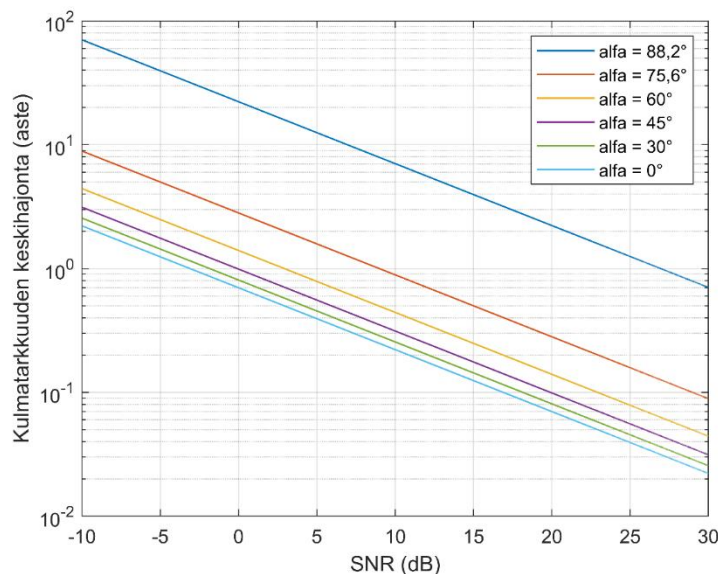
Kuvissa 7 ja 8 y-akselina on kulmaestimointitarkkuuden keskihajonta asteina ja kuvassa 9 y-akselina on etäisyysestimointitarkkuuden keskihajonta metreinä. Kuvaajien y-akseli on esitetty logaritmisella asteikolla, jotta käyrien eroja nähdään selvemmin. X-akselilla esitetyn signaali-kohinasuhteen tarkasteluväliksi on valittu arvot alkaen -10 dB:stä päättyen arvoon 30 dB. Tarkasteltavien muuttujien arvot, kuten antenniryhmän koko tai kaistanleveys, on valittu järkevien esimerkkitapausten perusteella huomioiden myös potentiaaliset erot, joita kuvaajien avulla voidaan tutkia.

Kuvassa 7 on esitetty kulmaestimointitarkkuuden riippuvuus antenniryhmän koosta. Kuvaajasta huomataan, että antenniryhmässä olevien antennielementtien suurempi määrä pienentää kulmaestimointitarkkuuden keskihajontaa ja parantaa tarkkuutta asteissa mitattuna. Huomataan myös, että mitä suurempi signaali-kohinasuhde, sitä parempi kulmaestimointitarkkuus. Suurempi signaali-kohinasuhde parantaa sekä kulma- että etäisyysestimointitarkkuuksia kaikissa kuvien 7, 8 ja 9 tapauksissa.



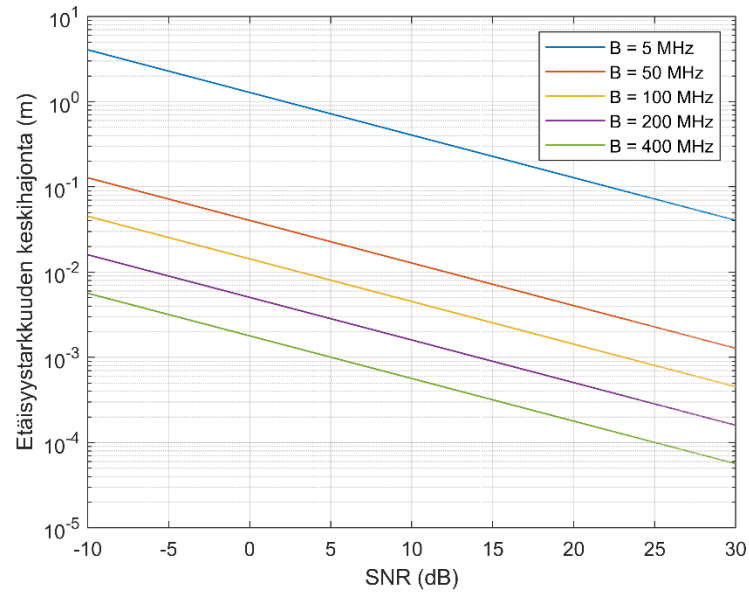
Kuva 7. Kulmaestimointitarkkuuden riippuvuus antenniryhmän koosta.

Kuvassa 8 on esitetty kulmaestimointitarkkuuden riippuvuus estimoitavan kulman suunnasta. Estimoitavan kulman suunta on määritelty siten, että kun mitattava kohde on suoraan antenniryhmän edessä, kulma on 0° . Jos estimoitava signaali on antenniryhmästä poikittain sivulle olevaan suuntaan, kulma on 90° . Kuvaajasta huomataan, että mitä lähempänä kulma on 0° , sitä pienempi on kulmaestimointitarkkuuden keskihajonta asteina ja siten tarkempi. Kuvaajasta nähdään myös, että kulmien ollessa lähempänä 0° kuin 90° , muutokset kulmaestimointitarkkuudessa ovat pienempiä. Esimerkiksi 15° :n muutos 30 asteesta 45 asteeseen on tarkkuudessa selvästi pienempi kuin $12,6^\circ$:n muutos $75,6$ asteesta $88,2$ asteeseen. Signaalin tullessa lähes täysin poikittaisessa kulmassa (lähes 90°) antenniryhmää kohti, kulmaestimointivirhe on erittäin suurta ja paikannus siten epätarkkaa. Erot ovat merkittäviä, kun huomioidaan kuvaajan logaritminen asteikko.



Kuva 8. Kulmaestimointitarkkuuden riippuvuus estimoitavan kulman suunnasta.

Kuvassa 9 on esitetty etäisyysestimointitarkkuuden riippuvuus kaistanleveydestä. Kuvaajassa on käytetty alikantaaaltojen taajuusvälin parametrin arvoa $f_{SC} = 15$ kHz kaikille eri kaistanleveyksien tapauksille. Kuvaajasta huomataan, että suurempi kaistanleveys pienentää etäisyysestimointitarkkuuden keskihajontaa ja siten parantaa etäisyysmittaukseen perustuvaa paikannusta.



Kuva 9. Etäisyysestimointitarkkuuden riippuvuus kaistanleveydestä.

5. SIMULOITUJA 5G-PAIKANNUSTULOKSIA

3GPP:n teknisessä raportissa 38.855 esitetään kootusti yhteenvetoja useista paikannussimulaatioiden tuloksista. Simuloidut tapaukset keskittyvät lähinnä vaakasuuntaiseen paikannustarkkuuteen eli todellisen sijainnin ja paikannusmenetelmän avulla lasketun sijainnin erotukseen. Tulokset esitetään dokumentissa pääosin prosenttipisteiden eli persentiilien avulla. [4] Persentiili esittää paikannustarkkuudessa etäisyysarvon, jonka tietty prosentuaalinen tapausten määrä täyttää [13]. 3GPP:n raportissa 38.855 paikannustarkkuuksien vertailussa on käytetty usein persentiilitasoja 50 %, 67 %, 80 % ja 90 % [4].

5.1 Käytettyjä paikannusmenetelmiä

Paikannustuloksia on kerätty 3GPP raporttiin 38.855 alalinkin (Downlink, DL), ylälinkin (Uplink, UL) sekä nämä molemmat yhdistävän paikannuksen osalta. Tässä työssä esitetään tuloksia kuitenkin vain alalinkin eli tukiasemasta päätelaitteeseen tulevan signaalin osalta.

Simulointeja on tehty pääosin aika- tai kulmaperusteisilla menetelmillä [4]. Joitain simulointeja on tehty myös kantoaallon vaiheisiin perustuvilla tekniikoilla ja fingerprinting-menetelmillä, kuten soluntunnistukseen ja vastaanotetun signaalin voimakkuuteen perustuvilla tekniikoilla [4, s. 16–17]. Tämän työn luvussa 5.3 keskitytään kuitenkin keskeisimpiin aika- ja kulmaperusteisilla menetelmillä saatuihin tuloksiin.

5.2 Tuloksiin vaikuttavia järjestelmän ominaisuuksia

Paikannustarkkuuksia on simuloitu kolmessa erilaisessa ympäristössä: avotoimistossa sekä niin sanotuissa mikrokaupunkiympäristössä (Urban Micro, UMi) ja makrokaupunkiympäristössä (Urban Macro, UMa). Avotoimistossa verkon sisäisten tukiasemien välimatkat ovat noin 20 metriä. UMi:ssa tukiasemien antennit sijaitsevat kattojen alapuolella ja tukiasemien välimatkat ovat noin 200 metriä. UMa:ssa tukiasemien antennit sijaitsevat kattojen yläpuolella ja tukiasemien välimatkat ovat noin 500 metriä. [4, s. 12–15]

Paikannussimulaatioiden eri skenaarioissa on ympäristön lisäksi käytetty kahta 5G-verkon päätaajuusaluetta: taajuusaluetta 1 (Frequency Range 1, FR1) ja taajuusaluetta 2 (Frequency Range 2, FR2). Simulaatioiden FR1-taajuuksina on käytetty 4 GHz:iä ja 2 GHz:iä. FR2-taajuutena on käytetty 30 GHz:iä. Simuloidut kaistanleveydet sekä alikantoaaltojen taajuusvälit kyseisillä kaistanleveyksillä on esitetty taulukossa 2. [4, s. 12–15]

Taulukko 2. Simuloidut kaistanleveydet ja alikantaaaltojen taajuusvälit.

Kaistanleveys (MHz)	Alikantaaallon taajuusväli (kHz)
400	120
100	30
50	15
5	15

Simulaatiotilanteissa käytettyjä tarkempia menetelmiä ja parametreja on esitetty 3GPP:n raportissa 38.855 (lähde [4]) sekä alkuperäisissä testausraporteissa. Tämän työn taulukoissa ja teksteissä on mainittu vain merkittävimmät parametrit.

5.3 Saavutettuja paikannustarkkuuksia

Seuraavien alalukujen taulukoissa esitetään merkittävimpiä huomioita aiheuttavia tuloksia. Alaluvuissa 5.3.1, 5.3.2 ja 5.3.3 esitetään saapumisaikojen erotukseen perustuvan paikannuksen (TDOA) tuloksia ja alaluvussa 5.3.4 esitetään kulmaperusteisen paikannuksen tuloksia. Paikannustarkkuuksien tulokset kuvaavat selkeästi eri parametrien ja ympäristöjen aiheuttamia eroja.

5.3.1 TDOA – Avotoimisto

Taulukossa 3 esitettyjen lukujen perusteella huomataan kaistanleveyden vaikutus TDOA-perusteiseen paikannukseen. Suurempi kaistanleveys mahdollistaa paremman paikannustarkkuuden. Kaikissa taulukon 3 tuloksissa synkronointivirhe on 0 ns.

Taulukko 3. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 0 ns. Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistanleveys (MHz)	Prosenttipiste			
			50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR1	4	100	1,1	1,5	2,4	5,7
FR1	4	50	2,0	2,9	4,6	8,1
FR1	2	5	7,5	10,1	13,0	16,0

Taulukosta 4 huomataan, että synkronointivirhe aiheuttaa paikannustarkkuuksien merkittävän heikkenemisen riippumatta kaistanleveydestä. Kaikissa taulukon 4 tuloksissa synkronointivirhe on 50 ns.

Taulukko 4. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 50 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistanleveys (MHz)	Prosenttipiste			
			50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR1	4	100	11,2	15,1	19,8	24,9
FR1	4	50	11,2	15,1	19,7	25,3

Vertaillen taulukkojen 3 ja 5 tietoja huomataan, että taajuus itsessään ei paranna paikannustarkkuutta, mutta korkeamman taajuuden mahdollistama suurempi kaistanleveys parantaa aikamittauksiin perustuvien paikannusmenetelmien tarkkuuksia. Näin ollen tulokset tukevat luvussa 4 esitettyjä teoreettisia tarkasteluja, sillä aikaperusteisten (TOA) mittausten tarkkuus ei riipu kanta-aaltotaajuudesta, vaan nimenomaan kaistanleveydestä.

Taulukko 5. Paikannustuloksia taajuusalueella FR2 sekä synkronointivirheillä 0 ns ja 50 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistan- leveys (MHz)	Synkronointi- virhe (ns)	Prosenttipiste			
				50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR2	30	400	0	0,2	0,4	0,7	1,4
FR2	30	100	0	1,1	1,6	2,4	4,8
FR2	30	400	50	15,8	21,7	29,1	38,1

5.3.2 TDOA – Mikrokaupunki

Tässä alaluvussa esitetään taulukoissa pitkälti samojen simulointien tuloksia kuin luvussa 5.3.1, mutta nyt ympäristö on toimiston sijaan mikrokaupunkiympäristö (UMi).

Kun verrataan taulukon 6 tietoja taulukkoon 3 huomataan, että näiden simulointien perusteella avotoimistossa saadaan hiukan parempia paikannustuloksia kuin mikrokaupunkiympäristössä. Kaikissa taulukon 6 tuloksissa synkronointivirhe on 0 ns.

Taulukko 6. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 0 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistanleveys (MHz)	Prosenttipiste			
			50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR1	4	100	1,2	1,6	3,5	9,1
FR1	4	50	2,0	2,8	5,5	11,0
FR1	2	5	15,8	21,7	29,8	40,3

Taulukko 7 on taas verrattavissa taulukkoon 4. Synkronointivirheet heikentävät paikannustuloksia vielä enemmän mikrokaupunkiympäristössä kuin avotoimistossa. Kaikissa taulukon 7 tuloksissa synkronointivirhe on 50 ns.

Taulukko 7. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 50 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistanleveys (MHz)	Prosenttipiste			
			50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR1	4	100	16,6	22,4	30,4	47,6
FR1	4	50	17,2	23,5	31,1	47,6

Taulukon 8 tiedot ja niiden muutokset verrattuna taulukkoon 5 vastaavat aiempia huomioita lukuun ottamatta sitä, että synkronointivirhe 400 MHz:n kaistanleveydellä ei heikentänyt paikannustarkkuuksia yhtä merkittävästi kuin avotoimiston tapauksessa. Synkronointivirheen aiheuttama virhe on tässäkin tapauksessa silti huomattava.

Taulukko 8. Paikannustuloksia taajuusalueella FR2 sekä synkronointivirheillä 0 ns ja 50 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Taajuus- alue	Taajuus (GHz)	Kaistan- leveys (MHz)	Synkronointi- virhe (ns)	Prosenttipiste			
				50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
FR2	30	400	0	1,3	3,0	5,7	9,7
FR2	30	100	0	2,4	4,4	7,9	17,5
FR2	30	400	50	14,2	18,5	22,2	26,9

5.3.3 TDOA – Makrokaupunki

Makrokaupunkiympäristössä (UMA) on tehty vastaavia simulointeja kuin avotoimistossa (luku 5.3.1) ja mikrokaupunkiympäristössä (luku 5.3.2). Makrokaupunkiympäristössä simulointeja on tehty lisäksi käyttäjälaitteen ollessa sisätilassa ja ulkoympäristössä.

Taulukon 9 makrokaupunkiympäristön tietoja verrattaessa vastaaviin avotoimisto- ja mikrokaupunkiympäristöjen taulukoihin 3 ja 6 huomataan, että paikannustulokset heikenevät, kun siirytään laajempaan ympäristöön. Etenkin persentiilitasolla 90 % tulokset ovat selkeästi heikkoja verrattuna niin avotoimistoon kuin mikroympäristöönkin. Makroympäristössä paikannustarkkuuden epävarmuus on siis suurempaa kuin muissa vertailuissa ympäristöissä. Mielenkiintoista on, ettei käyttäjälaitteen sijainti sisällä tai ulkona vaikuta kovinkaan merkittävästi tuloksiin. Kaikissa taulukon 9 tuloksissa synkronointivirhe on 0 ns.

Taulukko 9. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 0 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Käyttäjä-laitteen sijainti	Taajuus-alue	Taajuus (GHz)	Kaistan- leveys (MHz)	Prosenttipiste			
				50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
Sisällä	FR1	4	100	1,1	1,6	6,0	27,9
Ulkona				1,1	1,5	3,5	62,4
Sisällä	FR1	4	50	1,9	2,8	8,6	40,6
Ulkona				1,9	2,5	5,7	16,5
Sisällä	FR1	2	5	18,7	26,0	38,9	81,1
Ulkona				16,3	22,9	34,0	68,4

Taulukon 10 tulokset noudattavat samaa linjaa kuin vastaavat simuloinnit mikrokaupunkiympäristössä, jotka on esitetty taulukossa 7. Paikannustarkkuus on huonoa tasoa, kun paikannuksessa on mukana tavanomainen synkronointivirhe 50 ns. Toisin kuin ilman synkronointivirhettä, 50 ns:n synkronointivirheellä paikannustulokset ovat entistä huonommat, jos käyttäjälaite sijaitsee sisätiloissa verrattuna ulkoympäristön käyttötapaukseen. Kaikissa taulukon 10 tuloksissa synkronointivirhe on 50 ns.

Taulukko 10. Paikannustuloksia taajuusalueella FR1 ja synkronointivirheellä 50 ns.
Tiedot on kerätty lähteestä [14].

Käyttäjä-laitteen sijainti	Taajuus-alue	Taajuus (GHz)	Kaistan- leveys (MHz)	Prosenttipiste			
				50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
Sisällä	FR1	4	100	18	24	36	65
Ulkona				15	20	27	42
Sisällä	FR1	4	50	17	26	35	61
Ulkona				16	23	28	40

5.3.4 Kulmaperusteinen paikannus

Kulmaperusteisen paikannuksen dokumentoituja simulaatiotuloksia on vähemmän kuin aikaperusteisen paikannuksen tuloksia. Taulukkoon 11 on kerätty kulmaperusteisen paikannuksen keskeisimpiä simulaatiotuloksia. Taulukon 11 perusteella huomataan, että kulmaperusteinen paikannus on toimiva rajatussa toimistoympäristössä, jossa päätelaitteen etäisyys tukiasemista ei ole niin suuri ja tukiasemia on myös eri puolilla läheisemmillä etäisyyksillä kuin kaupunkiympäristöissä. Sen sijaan kaupunkiympäristössä paikannustulokset ovat erittäin heikkoja, eivätkä ne täytä edes luvussa 2.5 esitettyä 5G-paikannuksen tutkimuskohteiden minimisuorituskykyvaatimusta, joka on 50 metrin tarkkuus 80 %:lle käyttötapauksista [4, s. 11].

Taulukko 11. Paikannustuloksia taajuusalueilla FR1 ja FR2 ja synkronointivirheellä 0 ns. Tiedot on kerätty lähteestä [15].

Ympäristö	Taajuus-alue	Taajuus (GHz)	Kaistanleveys (MHz)	Prosenttipiste			
				50 % (m)	67 % (m)	80 % (m)	90 % (m)
Toimisto	FR2	30	400	1,2	1,6	2,1	2,8
UMi	FR2	30	400	44,1	75,2	100,8	134,6
UMi	FR1	4	100	59,2	84,3	102,1	140,2
UMi	FR1	2	5	61,7	85,6	124,5	160,8

5.4 Yhteenveto simuloiduista paikannustuloksista

Edellä esitettyjen simulaatiotulosten perusteella voidaan todeta, että TDOA-paikannuksella voidaan saavuttaa hyvä paikannustarkkuus, jos käytössä on riittävän suuri kaistanleveys ja synkronointivirhettä ei ole. Synkronointivirhe kuitenkin heikentää tuloksia merkittävästi riippumatta verkon kaistanleveydestä. Lisäksi paikannuksen luotettavuus on suurimmassa osassa tapauksista vielä heikkoa, sillä vain harvat simulaatiot saavuttivat muutaman metrin tarkkuuden 90 %:n persentiilitasolla. Monet käyttökohteet ja käyttötilanteet vaatisivat huomattavasti parempaa luotettavuutta. Kulmaperusteinen paikannus on simulaatioverkkojen kaltaisissa tapauksissa hyvällä tasolla vain toimistoympäristössä. Kaupunkiympäristön tulokset ovat vielä olleet erittäin heikkoja. Lyhyemmät tukiasemien etäisyydet parantavat kulmaperusteisen paikannuksen tuloksia ja kulmaperusteista paikannusta voidaan hyödyntää järkevästi vain verkoissa, joissa tukiasemien sijoittelu on tiheää.

6. YHTEENVETO

Tarkka 5G-laitepaikannus luo uusia mahdollisuuksia nykyisiin paikannusmenetelmiin verrattuna. 5G-paikannuksella on esimerkiksi potentiaalia parantaa paikannustarkkuuksia tiheästi rakennetuissa ympäristöissä ja jopa sisätiloissa. Paikannus on myös keskeisessä roolissa monissa 5G-verkon mahdollistamissa kehittyneissä käyttökohteissa ja sovelluksissa. Paikannusnäkökulma on ollut mukana jo 5G-mobiiliverkon suunnitteluvaiheessa, kun aiemmin paikannus mobiiliverkoissa on ollut lähinnä lisäominaisuus.

Tässä työssä käsiteltiin 5G-mobiiliverkkoa ja 5G-paikannusta yleisesti, potentiaalisia 5G-paikannusmenetelmiä ja niiden toimintaperiaatteita. Lisäksi selvitettiin teoreettisia paikannustarkkuuksia laskennallisilla menetelmillä sekä esitettiin olemassa olevia paikannustuloksia simulaatioverkoissa. Työn keskeisenä näkökulmana olivat 5G-paikannuksen vaatimukset ja potentiaalinen suorituskyky. Työssä opittiin 5G-paikannuksen taustaa ja toimintaperiaatteita sekä sen potentiaalista suorituskykyä ja tuloksia sen tämänhetkisestä suoriutumisesta.

Eri käyttökohteilla on erilaisia vaatimuksia paikannukselta, esimerkiksi paikannustarkkuus, saatavuus ja alkusijainninmäärittelyn kesto. Yleensä ongelmana paikannuksessa ei ole täyttää yksittäistä vaatimusta kerrallaan, vaan useampien vaatimusten yhdistäminen aiheuttaa haasteen tarkalle laitepaikannukselle. Käyttökohteiden tyyppi vaikuttaa huomattavasti vaatimuksiin: esimerkiksi kriittisissä käyttökohteissa virheitä ei juurikaan sallita ja energiatehokkaissa käyttökohteissa paikannusominaisuudet eivät saa kuluttaa liikaa virtaa. On myös järkevää valita käytettävät paikannusmenetelmät käyttökohteen ja sen vaatimusten mukaan tapauskohtaisesti.

5G-laitepaikannuksen potentiaalista suorituskykyä tutkittaessa teoreettinen tarkastelu osoitti, että mahdollisuuksia tarkkaan paikannukseen on olemassa. Simuloidut tulokset testiverkoissa kuitenkin näyttivät, että kehitys on vielä tarpeen suurimpiin odotuksiin nähden. Paikannustarkkuudet voivat olla jo hyvälläkin tasolla, jos verkon ja ympäristön ominaisuudet ovat suotuisat. Esimerkiksi aikaperusteisilla paikannusmenetelmillä tarkkuuksia parantavat leveät kaistanleveydet, joita 5G-verkon korkeat taajuudet mahdollistavat paremmin. Kulmaperusteisilla menetelmillä hyvän tarkkuuden vaatimukset ovat erityisesti tukiasemien tiheys ja antennielementtien määrä tukiasemissa. Tuloksissa on kuitenkin vielä huomattavasti vaihtelua. Osa samassa verkossa ja ympäristössä toteute-

tuista tapauksista tarjoaa hyvän tarkkuuden, mutta osa selvästi heikomman. Vaihtelu aiheuttaa epävarmuutta paikannukseen, vaikka luotettavuus on yksi 5G-paikannuksen keskeisistä vaatimuksista monissa käyttökohteissa.

5G-mobiiliverkkojen määrä yleisessä käytössä ja laajassa muodossaan on vielä vähäinen vuoden 2020 alussa. 5G-verkkojen määrä ja kattavuus kehittyy kuitenkin vähitellen vuodesta 2020 eteenpäin. 5G-laitepaikannuksen tulevaisuutta ajatellen paikannuksen ominaisuuksia tarvitsee tutkia ja simuloida vielä lisää. Etenkin paikannuksen tarkastelulle ja simuloinnille yleisissä verkoissa sekä paikannuksen kehittämiseksi analyysien perusteella on tarvetta. Jotta paikannusta voidaan kehittää käytännössä lähemmäs sen potentiaalista suorituskkyä, paikannuksen yksi keskeinen haaste eli virhetekijöiden minimointi on huomioitava tarkasti tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance, 5G White Paper, Versio 1.0, 17.2.2015. Saatavilla (Viitattu 31.10.2019): https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf
- [2] Tampereen yliopisto, Positioning and Location-Awareness in Future 5G Networks. Saatavilla (Viitattu 31.10.2019): <http://www.tut.fi/5G/positioning/>
- [3] R. McLaughlin, 5G Low Latency Requirements, Broadband Library, 25.5.2019. Saatavilla (Viitattu 21.11.2019): <https://broadbandlibrary.com/5g-low-latency-requirements/>
- [4] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification Group Radio Access Network, Study on NR positioning support (3GPP TR 38.855), Release 16, 03-2019. Saatavilla (Viitattu 31.10.2019): <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3501>
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification Group Services and System Aspects, Study on positioning use cases (3GPP TR 22.872), Stage 1, Release 16, 09-2018. Saatavilla (Viitattu 31.10.2019): <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3280>
- [6] Novatel, An Introduction to GNSS, Chapter 5 – Resolving Errors, Real-Time Kinematic. Saatavilla (Viitattu 1.11.2019): <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk/>
- [7] Ericsson, 5G Use Cases. Saatavilla (Viitattu 6.11.2019): <https://www.ericsson.com/4a8d61/assets/local/5g/5g-use-cases-ericsson.pdf>
- [8] Huawei, 5G Unlocks A World of Opportunities – Top Ten 5G Use Cases, 2017. Saatavilla (Viitattu 6.11.2019): <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/mbb/5g-unlocks-a-world-of-opportunities-v5.pdf?la=en>
- [9] A. Dammann, C. Mensing, S. Sand, Positioning in Wireless Communications Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014.
- [10] M. Al-Ammar, H. Al-Khalifa, AM. Al-Salman, A. Alarifi, A. Alnafessah, M. Al-saleh, S. Suheer, Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances, 2016. Saatavilla (Viitattu 27.11.2019): https://www.researchgate.net/publication/303256749_Ultra_Wideband_Indoor_Positioning_Technologies_Analysis_and_Recent_Advances
- [11] Data Science Central, Statistics Definitions, Cramér-Rao Lower Bound. Saatavilla (Viitattu 16.1.2020): <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/cramer-rao-lower-bound/>
- [12] Data Science Central, Statistics Definitions, Fisher Information. Saatavilla (Viitattu 16.1.2020): <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/fisher-information/>

- [13] Tilastokeskus, Tietoa tilastoista > Käsitteet > Persentiili. Saatavilla (Viitattu 2.12.2019): <https://www.stat.fi/meta/kas/persentiili.html>
- [14] Huawei, HiSilicon, Performance evaluations for NR positioning, 2019. Saatavilla (Viitattu 20.1.2020):
https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_96/Docs/R1-1901577.zip
- [15] Polaris Wireless, System-level Performance Evaluation for SSB Angle Based Positioning, 2019. Saatavilla (Viitattu 20.1.2020):
https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_96/Docs/R1-1902397.zip